

考虑开挖宽度效应的基坑受力变形分析

陈国雄¹, 贺佐跃¹, 黄仕平^{2*}

(1. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要:随着城市地下空间开发的规模化和综合化, 基坑的尺寸、形状也多种多样。该文依托金琴快线某实际基坑工程, 对桩水平位移、桩轴力、桩弯矩、横向支撑轴力、地表水平位移、地表竖向位移和坑底竖向位移等随基坑宽度的变化规律进行数值分析。结果表明: 桩最大水平位移随基坑宽度增加逐渐增加, 桩顶水平位移随基坑宽度增加逐渐减小。桩最大负轴力绝对值总体上随基坑宽度增加逐渐增加, 并趋于平稳。基坑宽度越大, 桩弯矩绝对值也越大。随基坑宽度增加, 横向支撑轴力先快速增加、再逐渐趋于平稳并保持恒定。随基坑宽度增加, 地表最大正水平位移逐渐增加并趋于平稳, 地表最大沉降逐渐增加; 坑底竖向位移先增加再减小, 整体形状也逐渐由单峰向双峰转变。坑底最大正竖向位移先增加、再减小, 并在基坑宽度为 10.0 m 时达到最大值(227 mm)。

关键词: 基坑; 开挖宽度; 受力; 变形; 安全

随着城市地下空间开发的规模化和综合化, 基坑的尺寸、形状也多种多样。高层建筑地下室、地下商城和市政工程等建设, 不断刷新着基坑工程的规模、深度和宽度; 而一些地铁车站风井、出入口及顶管工作井基坑宽度很窄, 其数量也占基坑工程一定比例^[1-2]。这些都迫切需要解决基坑宽度效应对变形的影响问题。

董洁^[3]通过有限宽度内支撑+排桩支护结构模型试验, 研究了在开挖过程中, 桩身内力、桩顶水平位移及整体稳定性等的变化规律; 王宝存^[4]通过合肥某基坑室内缩尺模型, 揭示了水体对深大复杂基坑开挖的作用过程、模式和效果, 得到了基坑整体稳定性及周围土体变形的变化规律; 郭少坡^[5]通过某地铁基坑的室内试验, 得到了考虑土-结相互作用的基坑变形及稳定性变化规律; 唐益群和栾长青^[6]通过对上海地铁九号线宜山路站的室内降水试验, 得到了降水井水位流量、孔隙水压力对基坑施工的安全性和稳定性影响规律; 李广信^[7]通过固结不排水三轴试验对应力路径进行了研究, 结果表明对应的强度指标在计算土压力与整体稳定性分析时偏于不安全, 对于饱和黏性土基坑抗力自重应采用浮重度; 刘娟^[8]通过毛竹管和钢管单排微型桩的室内试验发现, 采用毛竹排桩支护结构进行支护时, 对浅基坑的临时支护效果较好。数值分析

是基坑整体稳定性研究的重要手段之一, 能够有效弥补窄基坑稳定性现有理论分析的不足, 现有文献已开展了相关基坑开挖宽度效应的数值研究^[9-18]。然而, 在基坑开挖过程中, 针对基坑宽度效应对基坑受力、变形的影响规律研究较少。沿海地区由于普遍存在深厚软土层^[19-22], 基坑宽度对变形和受力的影响具有独特的规律, 尤其要引起重视^[24-26]。

该文依托金琴快线某实际基坑工程, 对桩水平位移、桩轴力、桩弯矩、横向支撑轴力、地表水平位移、地表竖向位移和坑底竖向位移等随基坑宽度的变化规律进行数值分析, 揭示考虑宽度效应的基坑受力变形变化规律, 为软土区基坑工程的设计施工提供一定的参考。

1 基坑宽度分析方案

金琴快线北延段工程位于珠海市高新区, 场区主要由杂填土、淤泥、淤泥质粉质黏土、砾砂、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩 1 和强风化花岗岩 2 组成, 土层厚度分别为: 1.8、6.5、5.0、4.5、2.5、6.0、2.0 和 21.7 m。

市政给排水管道直径常为 0.4~2.0 m, 考虑支撑厚度、工作面宽度时的基坑规范开挖宽度为 1.3~4.0 m。

收稿日期: 2021-05-25(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 11672108, 11911530692)

作者简介: 陈国雄, 男, 高级工程师, E-mail: 654451812@qq.com

* 通信作者: 黄仕平, 男, 博士, 副教授, E-mail: etasihuang@scut.edu.cn

管道直径为 2.0 m 时,满足规范要求的最小基坑深度为 3.4 m。为考虑基坑宽度对管道基坑变形的影响,该文基坑宽度设计方案如表 1 所示,其中基坑深度均为 3.4 m。拉森Ⅳ型钢板桩桩长 8.3 m, $\phi 508 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 横向钢支撑 1 道、水平间距 4 m。无坑周荷载,无坑底加固。

表 1 基坑宽度分析方案(基坑深度:3.4 m)

序号	基坑宽度/m	序号	基坑宽度/m
1	0.1	9	7.5
2	0.5	10	10.0
3	1.3	11	11.0
4	2.0	12	12.5
5	2.7	13	15.0
6	3.6	14	17.5
7	4.0	15	20.0
8	5.0		

修正莫尔-库仑模型能够很好地用于模拟基坑开挖过程,各土层模型参数如表 2 所示。

表 2 土层模型参数

土层名称	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	割线刚 度/kPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$
素填土	18	3 500	8	8
淤泥	16	2 000	3	4
淤泥质粉质黏土	17	2 000	4	5
砾砂	19	10 000	0	32
砾质黏性土	20	7 000	18	20
全风化花岗岩	20	15 000	21	22
强风化花岗岩 1	22	16 000	30	30
强风化花岗岩 2	22	18 000	32	32

对于修正莫尔-库仑模型,土层基本力学参数假定满足以下规定:① 割线刚度与土体压缩模量相等;② 切线刚度与割线刚度大致相等;③ 卸载模量等于 5 倍割线刚度。拉森Ⅳ型钢板桩弹性模量均为 $2.06 \times 10^8 \text{ kPa}$,重度均为 78.5 kN/m^3 。模拟工况如下:

- (1) 初始静力平衡,位移清零。
- (2) 拉森Ⅳ型钢板桩施工。
- (3) 第一步开挖 0.5 m。
- (4) 0.5 m 深度处横向支撑施工。
- (5) 后续开挖步依次进行。

2 结果分析

2.1 桩水平位移

桩最大水平位移及其位置随基坑宽度的变化如图

1 所示,其中正负值与 X 坐标一致,即指向坑内为正。

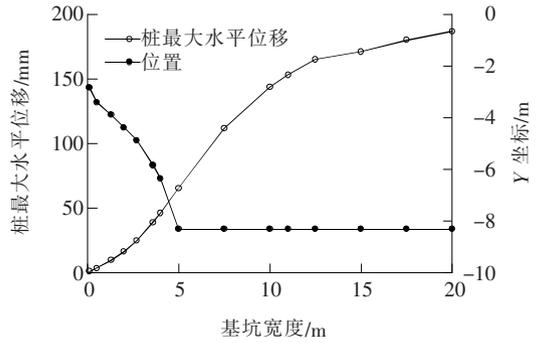


图 1 桩最大水平位移及其位置

由图 1 可以看出:桩最大水平位移随基坑宽度增加逐渐增加,最大可达 187 mm 左右,最小仅略大于 0 mm。增加趋势总体表现为 3 个阶段:

- (1) 基坑宽度较小时,桩最大水平位移曲线较为平缓,随基坑宽度缓慢增加。
- (2) 基坑宽度继续增加,桩水平位移曲线较为陡峭,随基坑宽度快速增加。
- (3) 基坑宽度较大时,桩水平位移曲线再次平缓,随基坑宽度缓慢增加。

桩最大水平位移所在位置,即其 Y 坐标值也随基坑宽度逐渐变化。当基坑宽度小于 5.0 m 时,桩最大水平位移对应的 Y 坐标值逐渐减小,即桩最大水平位移发生位置逐渐向桩下部转移;当基坑宽度大于 5.0 m 时,桩最大水平位移对应的 Y 坐标值均为 -8.3 m ,即发生在桩端位置。该文分析模型的基坑深度均为 3.4 m,而桩最大水平位移对应的最浅位置为地表下约 2.83 m,略高于基坑深度,且位于横向支撑位置以下。

桩顶水平位移对坑周构筑物的稳定和安全有着直接影响,根据坑周构筑物控制要求的不同,应限制桩顶的允许水平位移。桩顶水平位移如图 2 所示。

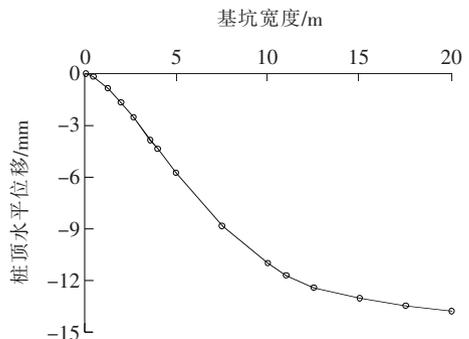


图 2 桩顶水平位移

由图 2 可以看出:桩顶水平位移随基坑宽度增加

逐渐减小,即水平变形逐渐增加。当基坑宽度为 0.1 m 时,桩顶水平位移接近于 0 mm;随基坑宽度增加,桩顶水平变形先快速增加再逐渐趋于平稳,桩顶水平变形最大可达 13.8 mm 左右。可以预想,当基坑宽度继续增加时,桩顶水平位移的变化幅度会非常小。意味基坑宽度对桩顶水平位移的影响具有一定的范围。

2.2 桩轴力

桩最大负轴力随基坑宽度的变化规律如图 3 所示,负值表示受压。

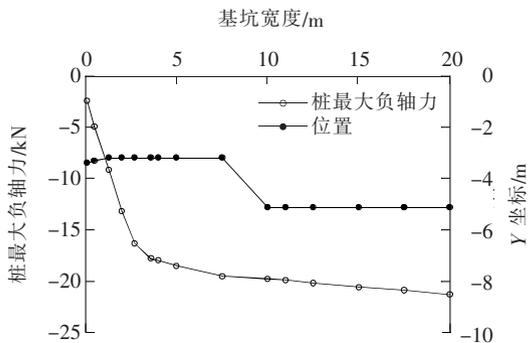


图3 桩最大负轴力

由图 3 可以看出:桩最大负轴力绝对值总体上随基坑宽度增加而逐渐增加,并逐渐趋于平稳。这说明:基坑宽度对桩最大负轴力的影响先显著、再趋于稳定。桩最大负轴力绝对值最小仅为 2.45 kN(基坑宽度为 0.1 m),最大可达 21.3 kN(基坑宽度为 20.0 m)。此外,桩最大负轴力所对应的位置,在基坑宽度较小时,深度略有减小,但总体相差不大并保持在 3.2 m 左右,略高于基坑开挖深度;在基坑宽度较大时,深度保持稳定在 5.12 m 处。在基坑宽度为 7.5~10.0 m,深度显著增加,在曲线上呈现出突变。

2.3 桩弯矩

拉森Ⅳ型钢板桩弯矩如图 4 所示。Midas GTS 中规定:一维单元弯矩以上压下拉为正,正方向符合右手螺旋准则,即右手四指沿弯矩作用线,大拇指方向即为弯矩作用正方向。

由图 4 可以看出:在横向支撑位置以上,桩弯矩为正值,并在横向支撑位置处达到极值。而在横向支撑位置以下,总的来说基坑宽度越大,桩弯矩绝对值也越大;桩弯矩由正值逐渐向负值转变,桩弯矩绝对值先随深度逐渐增加,到达某一深度后再逐渐减小,并在桩端位置弯矩均约为 0。对于基坑宽度为 0.1、0.5 和 1.3 共 3 个水平,除具有上述一般规律外,在桩下半段,桩弯矩会重新随深度转变为正值、再减小至约 0。

桩身大部分受负弯矩作用。桩最大负弯矩及其位

置随基坑宽度的变化规律如图 5 所示。

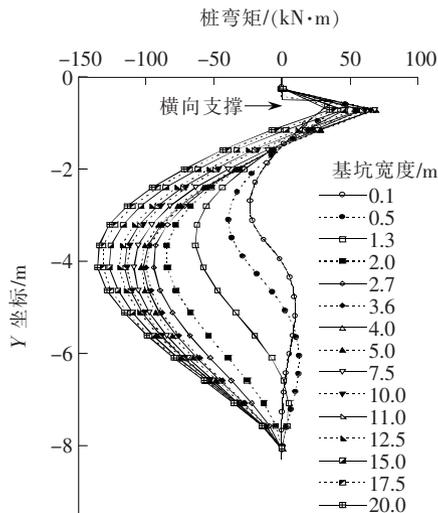


图4 桩弯矩

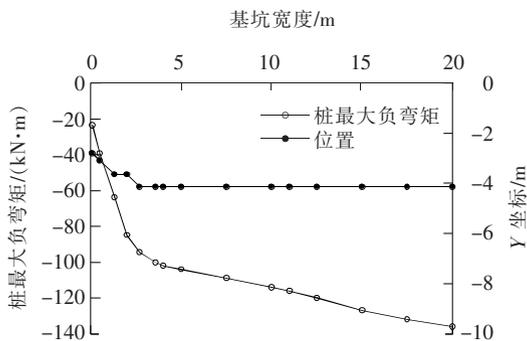


图5 桩最大负弯矩及其位置

由图 5 可以看出,总体上看,桩最大负弯矩绝对值随基坑宽度增加逐渐增加,但增加速率逐渐减小,在曲线上表现为逐渐趋于平缓。基坑宽度为 0.1 m 时,桩弯矩约为 $-23.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$;基坑宽度为 20.0 m 时,桩弯矩约为 $136 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。这说明基坑宽度较小时,对桩最大负弯矩的影响较为显著。此外,与桩最大负弯矩对应的位置也表现出类似的规律。当基坑宽度较小时,桩最大负弯矩深度随基坑宽度逐渐增加;当基坑宽度较大时,即达到 2.7 m 以后,桩最大负弯矩深度保持在 4.14 m。但总的来说,深度均处于 2.8~4.14 m,即均位于坑底附近。

桩最大正弯矩及其位置随基坑宽度的变化规律如图 6 所示。

由图 6 可以看出:随基坑宽度增加,桩最大正弯矩总体上先增加再减小,并在基坑宽度为 5.0 m 时达到最大值 ($69.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$)。桩正弯矩值为 $34.7 \sim 69.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。但相对于桩负弯矩,桩正弯矩数值上较

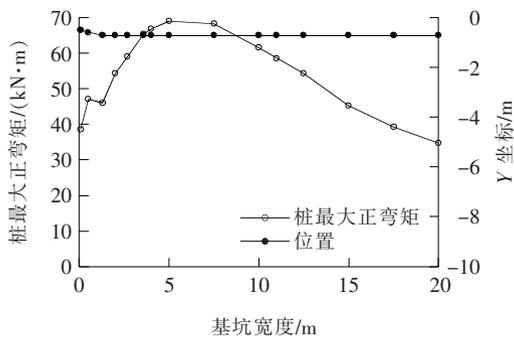


图 6 桩最大正弯矩及其位置

小。此外,与桩最大正弯矩对应的位置变化很小,处在基坑宽度较小时深度略有下降,在基坑宽度为 1.3 m 后始终保持不变。事实上,横向支撑的位置为地表以下 0.5 m 深度处,理论上最大正弯矩位置也应在此位置。但由于在进行数值建模时,为提高计算效率,网格单元尺寸通常不宜太小;而若网格单元尺寸太大,则会影响计算精度。该文所有数值模型的网格单元尺寸均为 0.5 m,但在网格单元的边长略有差异,且计算结果均以单元中心为基准,这在一定程度上会导致某些深度的数据缺失。因此,该节计算深度均在横向支撑位置附近,结果仍然是可以接受的。

2.4 横向支撑轴力

横向支撑轴力如图 7 所示。

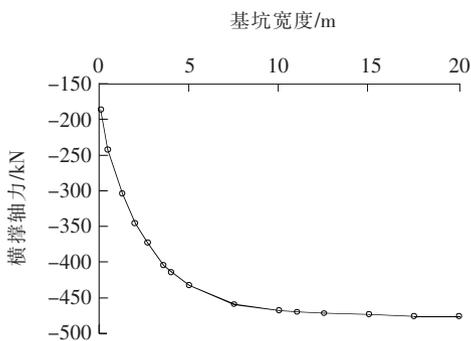


图 7 横向支撑轴力

由图 7 可以看出:总的来说,无论基坑宽度取值多少,横向支撑轴力均为负值,说明横向支撑均处于受压状态。此外,随基坑宽度增加,横向支撑轴力先快速增加、再逐渐趋于平稳并保持恒定。当基坑宽度为 0.1 m 时,横向支撑轴力约为 -187 kN;当基坑宽度为 17.5 m 或 20.0 m 时,横向支撑轴力约为 -476 kN。这表明:当基坑宽度较大时,尽管横向支撑轴力增加有限,但仍要注意横向支撑的设计,保证能够承受足够的轴力。实际工程设计时,应予以重视。

2.5 地表最大水平位移

地表最大正水平位移随基坑宽度的变化规律如图 8 所示,正值表示位移指向坑内。

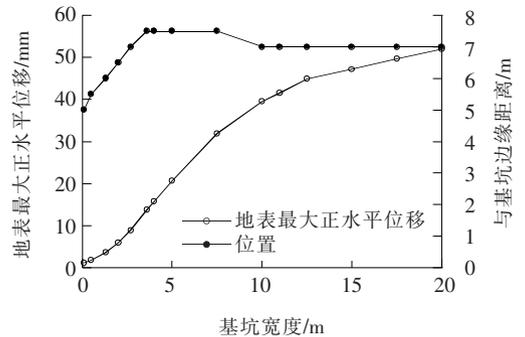


图 8 地表最大水平位移

由图 8 可以看出:随基坑宽度增加,地表最大正水平位移逐渐增加并趋于平稳,且绝对值较地表最大负水平位移更大,为 1.08~51.9 mm。此外,与地表最大正水平位移对应的位置,或与基坑边缘的距离,随基坑宽度增加先增加、再保持不变、最后在基坑宽度为 7.5 m 时略有下降并再次保持不变。总的来说,与基坑边缘的距离处于 5.0~7.0 m 范围内。表明在该范围以内,对水平位移要求严格的构筑物要引起足够重视。

2.6 地表最大沉降

地表最大负竖向位移或沉降及其位置随基坑宽度的变化规律如图 9 所示。

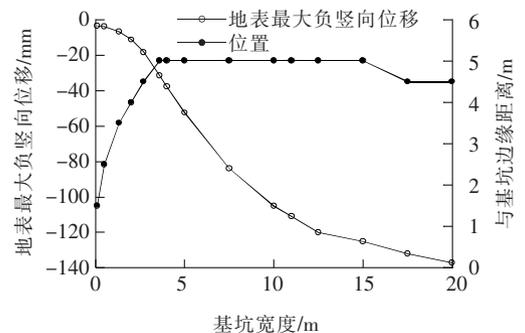


图 9 地表最大沉降及其位置

由图 9 可以看出:随基坑宽度增加,地表最大沉降逐渐增加,但增加速率逐渐减小。地表沉降在基坑宽度为 20.0 m 时达到最大值,约为 137 mm。与地表最大沉降对应的位置或与基坑边缘的距离,随基坑宽度增加,先增加、在基坑宽度为 3.6~15.0 m 时保持不变、在基坑宽度为 15.0 m 时略有下降并最终再次保持不变。与基坑边缘的距离总体上为 1.5~5.0 m。这表明:在此范围之内,对于沉降要求严格的构筑物,

也应当引起足够重视并采取合理的防治措施,保证足够的稳定性和安全性。

2.7 坑底竖向位移

坑底竖向位移如图 10 所示。

由图 10 可以看出:在所有基坑宽度水平下,坑底竖向位移同样均以坑底中心对称分布。总的来说,随基坑宽度增加,坑底竖向位移先增加、再减小。坑底竖向位移的形状随基坑宽度变化显著,坑底竖向位移在邻近基坑边缘的上升段逐渐向右偏移,即上升段斜率逐渐减小。此外,坑底竖向位移整体形状,也逐渐由单峰向双峰转变。当基坑宽度不大于 12.5 m 时,坑底竖向位移均为单峰形状;当基坑宽度大于 12.5 m 时,坑底竖向位移均为双峰形状,且基坑宽度越大,双峰形状越明显。拉森Ⅳ型钢板桩的变形、开挖时坑底土层的回弹变形,是导致坑底竖向位移形状改变的主要原因。当基坑宽度较小时,这两种变形共同导致在坑底中心产生最大竖向位移;而当基坑宽度增加到某一值时,桩的作用逐渐减弱,导致坑底竖向位移开始减小。

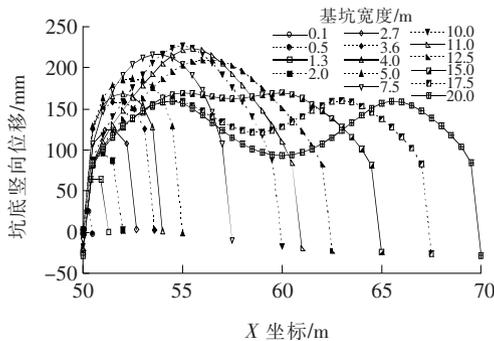


图 10 坑底竖向位移

以单侧坑底为分析对象,坑底最大正竖向位移(或隆起)及其位置随基坑宽度的变化规律如图 11 所示。

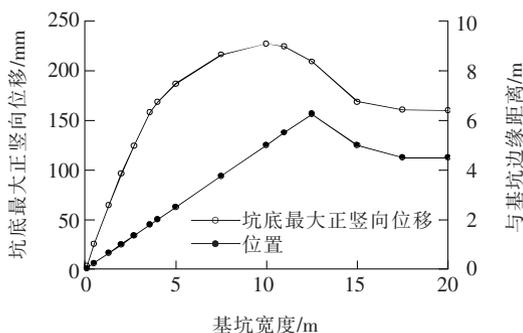


图 11 地表最大隆起及其位置

由图 11 可以看出:随基坑宽度增加,坑底最大正竖向位移先增加、再减小,并在基坑宽度为 10.0 m 时

达到最大值,约为 227 mm。需要注意的是,坑底最大正竖向位移随基坑宽度增加段,增加速率逐渐减小;而在减小段,减小速率也逐渐减小。相较于单峰形状时,双峰形状时的坑底最大正竖向位移要更小。此外,与坑底最大正竖向位移对应的位置,或与基坑边缘的距离,先随基坑宽度增加线性增加;而当基坑宽度大于 12.5 m,即当坑底竖向位移开始呈现双峰形状时,与基坑边缘距离随基坑宽度增加逐渐减小,但减小速率同样逐渐减小,并最终稳定在 4.5 m。这表明:当坑底竖向位移由单峰形状转变为双峰形状时,峰值及其对应的与基坑边缘距离均会减小。

实际监测数据表明:当基坑宽度为 4 m、基坑深度为 3.4 m 时,桩顶水平位移为 4.52 mm,地表最大沉降为 39.6 mm,坑底最大隆起为 172.4 mm,分别与该文模拟值 4.35、37.6 和 168 mm 大致相同,验证了该文数值模拟结果的有效性。

3 结论

依托金琴快线某实际基坑工程,对桩水平位移、桩轴力、桩弯矩、横向支撑轴力、地表水平位移、地表竖向位移和坑底竖向位移等随基坑宽度的变化规律进行数值分析,得到以下结论:

(1) 桩最大水平位移随基坑宽度增加逐渐增加,桩顶水平位移随基坑宽度增加逐渐减小。桩最大负轴力绝对值总体上随基坑宽度增加逐渐增加,并趋于平稳。基坑宽度越大,桩弯矩绝对值也越大,桩最大负弯矩绝对值随基坑宽度增加逐渐增加,而桩最大正弯矩总体上先增加、再减小。随基坑宽度增加,横向支撑轴力先快速增加、再逐渐趋于平稳并保持恒定。

(2) 随基坑宽度增加,地表最大正水平位移逐渐增加并趋于平稳,相应位置随基坑宽度增加先增加、再保持不变、最后在基坑宽度为 7.5 m 时略有下降并再次保持不变。随基坑宽度增加,地表最大沉降逐渐增加,但增加速率逐渐减小,相应位置随基坑宽度增加,先增加、在基坑宽度为 3.6~15.0 m 时保持不变、在基坑宽度为 15.0 m 时略有下降并最终再次保持不变。

(3) 随基坑宽度增加,坑底竖向位移先增加、再减小。坑底竖向位移的形状随基坑宽度变化显著,坑底竖向位移在邻近基坑边缘的上升段逐渐向右偏移,即上升段斜率逐渐减小;坑底竖向位移整体形状,也逐渐由单峰向双峰转变。坑底最大正竖向位移先增加、再

减小,并在基坑宽度为 10.0 m 时达到最大值,约为 227 mm。

参考文献:

- [1] 李郁,周金苗,黄耀福,等.从巨型城市区域视角审视粤港澳大湾区空间结构[J].地理科学进展,2018,37(12):1 609—1 622.
- [2] 刘全林,杨有莲.加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构的稳定性分析及其应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):5 331—5 336.
- [3] 董洁.有限宽度基坑内支撑+排桩支护结构室内土工模型试验及数值分析[D].中北大学硕士学位论文,2016.
- [4] 王宝存.合肥某邻水基坑开挖稳定性分析与模型试验研究[D].合肥工业大学硕士学位论文,2016.
- [5] 郭少坡.考虑土-结相互作用地铁基坑变形及稳定性研究[D].沈阳建筑大学硕士学位论文,2018.
- [6] 唐益群,栾长青.上海地铁宜山路站室内降水大型模型试验分析[J].地下空间与工程学报,2008,17(3):483—488.
- [7] 李广信.基坑中土的应力路径与强度指标以及关于水的一些问题[J].岩石力学与工程学报,2015,31(11):2 269—2 275.
- [8] 刘娟.软土层环保型基坑支护结构研究[D].湖北工业大学硕士学位论文,2018.
- [9] 王洪新,孙玉永.考虑基坑开挖宽度的杆系有限元算法及试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2 781—2 795.
- [10] 侯景军,何俊,汤正俊,等.软土基坑中内插 H 型钢重力式挡土墙支护的变形及稳定性的有限元研究[J].岩土力学,2014,35(S1):431—436.
- [11] 何超,陈沛,周顺华.软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响[J].华东交通大学学报,2015,32(6):86—91.
- [12] 张雷,刘振宏,钱元运,等.深基坑宽度对周围建筑影响的有限元分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(S1):1 312—1 315.
- [13] Faheem Hamdy, Cai Fei, Keizo Ugai, et al. Two-dimensional Base Stability of Excavations in Soft Soils Using FEM[J]. Computers & Geotechnics, 2003, 30(2): 141—163.
- [14] Nianqing Zhou, Vermeer Pieter — A, Lou Rongxiang, et al. Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Dewatering and Optimization of Controlling Land Subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 251—260.
- [15] Zhang Chuang, Li Jian — Zhong, He Yong. Application of Optimized Grey Discrete Verhulst — BP Neural Network Model in Settlement Prediction of Foundation Pit[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(15): 441—450.
- [16] Zhang Xuemin, Yang Junsheng, Zhang Yongxing, et al. Cause Investigation of Damages in Existing Building Adjacent to Foundation Pit in Construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 83: 117—124.
- [17] J — H Wang, Xu Z — H, Wang W — D. Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985—994.
- [18] Yong Tan, Wei Bin. Observed Behaviors of a Long and Deep Excavation Constructed by Cut — and — Cover Technique in Shanghai Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2011, 138(1): 69—88.
- [19] 秦坤元,刘五一,肖育斐,等.深基坑开挖对邻近边坡稳定性影响与控制[J].中外公路,2019,39(4):23—27.
- [20] 王继槐.管廊深基坑大间距支护桩数值模拟及施工监测[J].中外公路,2020,40(3):39—42.
- [21] 胡风明,宋健,闫磊,等.危岩带下深基坑开挖关键技术及仿真分析[J].中外公路,2020,40(4):11—15.
- [22] 刘建威,于鹏,李德建.大型深基坑紧邻磁浮高架桥和站场结构施工影响分析[J].中外公路,2020,40(6):32—36.
- [23] 李浩,贺祖浩,杨钊,等.软弱地层临近深基坑工程房屋沉降注浆控制研究[J].中外公路,2021,41(1):26—30.
- [24] 王洪新.基坑宽度对围护结构稳定性的影响[J].土木工程学报,2011,44(6):128—134.
- [25] 王洪新.基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J].岩土力学,2016,37(S2):433—441.
- [26] 应宏伟,王小刚,张金红.考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J].工程力学,2018,35(5):127—133.